

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H00801

研究課題名（和文）イオン・電子輸送に基づく動的構造制御とエネルギー貯蔵型燃料電池の開発

研究課題名（英文）Dynamically structural control and development of energy-storing type fuel cells based on ionic electronic transport

研究代表者

大友 順一郎 (Otomo, Junichiro)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：90322065

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 27,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、イオン・電子輸送現象と充放電時の酸化還元サイクルにおける反応・輸送・形態の動的変化を組み合わせた材料設計を行い、高性能燃料電池の技術を基にエネルギーの大量貯蔵と発電機能を有する新規な電気化学システムを提案した。イオン・電子伝導性を有する活物質材料による高速水素生成反応について検討し、高速な酸化還元反応と安定性を実現するキャリア粒子の開発を行った。さらに、極めて高効率なプロトン伝導性セラミック燃料電池（PCFC）を設計し、プロトタイプセルを開発した。開発したキャリア粒子とPCFCから成るエネルギー貯蔵型燃料電池システムを設計し、高性能かつ経済性を有するシステム提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果の学術的意義は、イオン、電子輸送物性を制御し、長寿命の酸化還元反応を実現するエネルギー貯蔵型燃料電池システムを設計・提案する点にある。この研究を通じて、金属酸化物の酸化還元反応速度の情報によるシステム全体への影響について明らかにすることができた。さらに、将来の大規模な再生可能エネルギーの導入による電力の平準化や、高密度エネルギー貯蔵と高効率なエネルギー変換を同時に満たす新しい技術が必要であり、本研究は、将来のシステム開発に貢献できる内容である。エネルギー密度についても、金属酸化物を用いることで、リチウムイオン電池等の従来技術を大きく上回るシステムを構築することができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, material design was conducted in combination with ionic-electronic transport and dynamic changes in reaction / transport / morphology in redox cycles between charge and discharge, and a new electrochemical system with functions of energy storage and power generation was proposed based on high-performance fuel cell technology. We investigated active materials which enable fast hydrogen generation reaction with ionic and electron transport properties, and developed carrier particles realizing high redox reaction rates and stability. In addition, an extremely efficient proton-conducting ceramic fuel cells (PCFC) was designed, and a prototype cell was developed. Finally, we designed an energy storage fuel cell system consisting of the developed carrier particles and PCFC, and proposed the high-performance and economical system.

研究分野：反応工学、電気化学、エネルギーシステム設計

キーワード：低炭素社会 燃料電池 イオン伝導体 酸化還元反応

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年の世界的な再生可能エネルギーの本格的な普及に伴い、大容量かつ経済性に優れたエネルギー貯蔵システムの開発が必要になっている。本研究では、イオン・電子輸送現象と充放電時の酸化還元サイクルにおける反応・輸送・形態の動的変化を組み合わせた材料設計に基づき、燃料電池の技術を基にエネルギーの大量貯蔵と発電機能を有する新規な電気化学システムを提案する。すなわち、500°C~600°C近傍で作動するプロトン伝導性セラミック燃料電池（PCFC）を用いた酸化還元サイクルによる高エネルギー密度の貯蔵能を有するシステムの構築を目的とする。具体的には、酸化還元サイクル（1.水蒸気電解の生成水素による活物質である金属酸化物の還元（充電・化学エネルギー貯蔵）→2.金属酸化物電極の水蒸気酸化による水素生成（化学エネルギー放出）→3.生成水素による発電（放電））を実現する新規システムを開発する。提案するエネルギー貯蔵・変換システムの特徴は、高密度エネルギー貯蔵、長寿命、低コスト、および二酸化炭素分離（炭化水素燃料利用時）を同時に満たすシステムである。

以上のシステム設計を踏まえ、材料開発、デバイス作製、酸化還元反応、およびシステム設計までの一連の検討を行った。

2. 研究の目的

高いエネルギー貯蔵能と長寿命化を達成するための電極材料の動的な構造形成・安定性を実現する手法を構築し、新たなエネルギー貯蔵型燃料電池の開発を目的とする。すなわち、酸化還元サイクルを高効率かつ安定に実現する電極材料について、イオン・電子輸送制御の観点から開発し、再生可能エネルギーの大容量貯蔵と発電機能を併せ持つ低炭素社会の実現に資する次世代エネルギーシステムの構築を行う。

3. 研究の方法

（3-①）新型燃料電池デバイスの開発

新規プロトン伝導性電解質であるタングステン酸ランタン($\text{La}_{28-x}\text{W}_{4+x}\text{O}_{54+3x/2v2-3x/2}$: LWO)を含め、ペロブスカイト型プロトン伝導体による理論セル効率について検討した。さらに、電解質内のホール伝導を抑制する目的で、異なる電解質膜を用いた2層構造の電解質膜を設計し、リーク電流を抑えた高効率な積層型 PCFC の設計を行った。

次に、実際に積層型 PCFC の作製を行った。LWO はクエン酸重合法を用いて合成した。発電試験用 PCFC の単セルのアノードには NiO と 10%ガドリニアドーパセリア ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$: GDC10) あるいは $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BZY20)を用い、燃料極支持型を前提としたサーメット電極を使用した。電解質と電極の界面での反応を抑制する中間層として GDC10 またはランタンドープセリア $\text{La}_{2.6}\text{Ce}_{1.4}\text{O}_{7-\delta}$ (LDC)を用いた。カソードには $\text{SrFe}_{0.95}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_{3-\delta}$ (SFN)または $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF)を用いた。セル構成は、以下の3種類である。これらのセルについて電気化学測定実験を実施した。

- a) Ni-GDC|GDC|LWO|GDC|SFN（積層膜型 1）
- b) Ni-BZY|BZY|LDC|LWO|LDC|LSCF（積層膜型 2）
- c) Ni-BZY|BZY|LSCF（単層膜型 1：比較用）

（3-②）エネルギー貯蔵用活物質の開発と酸化還元反応速度の評価

活物質であるキャリア粒子は、固相法や共沈法により調整した。本研究では、主に鉄の酸化還元サイクルを用いた。Fe/Al₂O₃を標準的なキャリア粒子として評価したが、イオン・電子混合伝導体を用いることで酸化還元反応速度向上を目指した。また、酸化還元サイクル時に支持体への Fe の固溶と析出させることにより、動的な Fe ナノ粒子の生成を進行させ、酸化還元サイクル時の Fe の凝集抑制を意図したキャリア粒子の合成を試みた。本研究では、マンガン酸カルシウムに鉄をドーパしたマンガン系キャリア ($\text{CaMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$; CMFO)、およびジルコン酸バリウムに鉄をドーパしたプロトン伝導性を有するキャリア ($\text{BaZr}_{0.9-x}\text{Fe}_x\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$, BZFY) について検討を行った。得られた各種粒子の反応活性とその温度依存性を熱重量分析装置によって分析した。反応温度を変化させ酸化還元反応特性について観測を行った。得られた結果を修正 Shrinking-core モデルを用いてフィッティングし、流動層設計に用いる粒子パラメータを算出した。流動層反応器は KL モデル(Kunii-Levenspiel model)により反応器設計を行った。反応速度解析によって得られた粒子パラメータを用い、流動層内の粒子転化率の時間依存性を得た。最後に、本システムの充放電時（水蒸気電解+粒子の還元反応）および発電時（燃料電池+粒子酸化反応）それぞれにおけるシステムのエネルギー効率を算出した。

4. 研究成果

（4-①）高効率積層型 PCFC の設計

プロトン伝導性セラミック燃料電池（PCFC）は、酸化物イオン伝導体を用いた固体酸化物燃料電池（SOFC）と比較して低温作動化が可能であり、従来の SOFC を凌駕する発電効率に加え、材料選択性の拡大や低温作動による長寿命化が期待されている。本プロジェクトでは、新たなプロトン伝導性固体電解質の材料開発と薄膜型 PCFC の開発を行った。すなわち、材料界面での輸送現象や、電子、ホール伝導を含めたキャリア輸送特性の制御に基づくセル設計により、PCFC の高性能化について検討した。

従来のペロブスカイト型プロトン伝導体では、酸化雰囲気下でホール伝導性が生じるため、セルの電解質膜内でのリーク電流が発生し、起電力や発電効率の低下が問題になっていた。我々が JSPS 科研費基盤研究(B) (25281061) により開発した $\text{La}_{28-x}\text{W}_{4+x}\text{O}_{54+3x/2}$ (LWO) は、高い La/W 比において良好なプロトン伝導性を示し、かつ酸化雰囲気下でも低いホール伝導性を維持することが明らかになっている。密度汎関数法に基づく計算 (NEB 法) により、LWO では La 周辺の格子酸素 (La-O-La) を介したホッピング伝導の活性化エネルギーが低いことが示され、La/W 比の増加によりプロトン伝導率が向上することが示唆されている。以上に述べた LWO のホール伝導性の抑制効果は、PCFC の性能向上に大きく貢献する。La/W 比が 6.7 である LWO67 を用いて、LWO の輸送物性が PCFC の性能に与えるインパクトについて評価を行った。

まず、PCFC 単セルの理論効率について、Wagner 理論に基づき、電解質のプロトン伝導率、電子伝導率、およびホール伝導率を用いて計算を行った。LWO67、 $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BZY20)、 $\text{BaZr}_{0.8}\text{Yb}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BZYb20)、 $\text{La}_{2.6}\text{Ce}_{1.4}\text{O}_{6.7}$ (LDC26)、 $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCY10)、及び $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ce}_{0.7}\text{Y}_{0.1}\text{Yb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BZCYYb1711) の理論効率について評価を行った。低電流密度の領域において、LWO67 で理論効率 0.8 の値が得られた。これは LWO67 の低いホール伝導率に基づく結果である。この特性を活かして以下に示す積層型 PCFC の設計を行った。

次に LWO の輸送特性を利用した積層型 PCFC の設計を行った。LWO67 をホールブロッキング層として利用し、BZY20 や BZCYYb1711 と組み合わせた積層電解質膜の設計が考えられる。すなわち、2 種のプロトン伝導性電解質薄膜を積層させることにより、適切な積層構造を設計し、電解質内部のポテンシャル分布を適切に制御することで、プロトン、電子、およびホール伝導の輸送特性を高効率セルが実現できるように調整し、セル性能を向上させることができる。LWO67 によるホール伝導抑制効果が期待されるため、LWO67 をカソード側に配置することで起電力や発電効率の向上を図った。図 1 にカソード側に LWO67 を配置し、アノード側に BCY10、BZY20、および BZCYYb1711 を配置した BCY10|LWO67、BZY20|LWO67、及び BZCYYb1711|LWO67 二層積層膜を用いた積層型 PCFC の理論効率の計算結果を示す。BZY20 と LWO67 のそれぞれのポテンシャルを Wagner 理論に基づき計算し、両者の界面で酸素 (あるいは水素) ポテンシャルが一致する制約条件で解を求めた。二層電解質の膜厚を $10\mu\text{m}$ に固定し、BCY10、BZY20、BZCYYb1711 と LWO67 の膜厚比を変化させ最適化計算を行った (図 1)。3 種の積層型 PCFC について単層膜と比較して理論効率は 10% 程度高い値を示した。この値は、これまで報告されている理論効率のうち、世界トップレベルの値である。このように、LWO67 の輸送特性を利用することで、従来の SOFC や PCFC と比較して格段に効率の高いセル設計が可能となることを明らかにした。

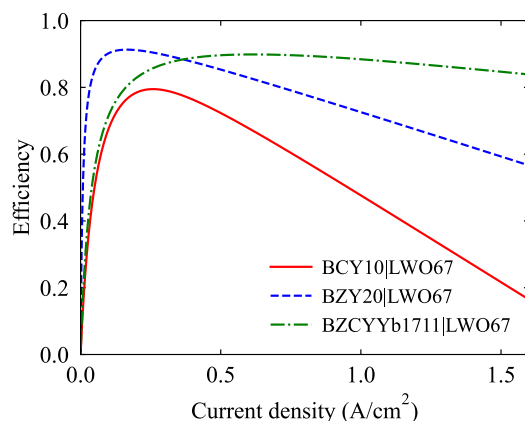


図 1 積層型 PCFC セルの理論効率の電流密度依存性 (電解質膜厚: $10\mu\text{m}$; 作動温度: 600°C ; 燃料極: $97\%\text{H}_2/3\%\text{H}_2\text{O}$; 空気極: $97\%\text{air}/3\%\text{H}_2\text{O}$ (3%加湿空気))

(4-②) 高効率積層型 PCFC の作製と発電特性

以上のセル設計の結果を踏まえ、開発した新型電解質 (LWO67) を用いて、PLD 法によりアノード支持積層型 PCFC を作製した。まずは、 $\text{Ni-GDC|GDC|LWO|GDC|SFN}$ (積層膜型 1) の作製を行い、LWO67 を用いたセルの開発を行った。その結果、 600°C における開放起電力は 0.94V (理論起電力 0.99V) が観測され、LWO67 を電解質膜に用いた安定なセルとして初めての発電事例となった。その成果は英文誌に掲載された (<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.04.015>)。

続いて、Ni-BZY アノード支持基板上に BZY 単層セル (膜厚 $t = 3.5\mu\text{m}$) および $\text{BZY}(t = 3\mu\text{m})|\text{LWO}(t = 1\mu\text{m})$ から構成される積層セルを作製し、上述した理論計算に基づく起電力向上効果、すなわち発電効率の改善について実験的に検証した。なお、LWO と BZY の界面で、Ba の拡散が確認されたので、反応抑制層として LDC を挿入した。

PLD 法により作製した試料において、積層型セルは、開放起電力 $V_{oc} = 1.01\text{V}$ を示し、BZY 単層セル ($V_{oc} = 0.93\text{V}$) を上回る値を示した (図 2)。以上から、積層化によるリーク電流の抑制がセル性能の向上に有効であることを実際の積層型セルの作製によって明らかにした。これらの成果については、国際会議紀要 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/09101.1019ecst>)、およ

び英文誌で発表を行った (<https://doi.org/10.2109/jcersj2.20204>)。一方、出力密度を見ると、単層セルの方が積層型よりも大きい。2相界面での膜抵抗の増加がその原因の一つであり、今後の性能向上に向けては、電極—電解質、電解質—電解質の界面の最適化が必要になる。

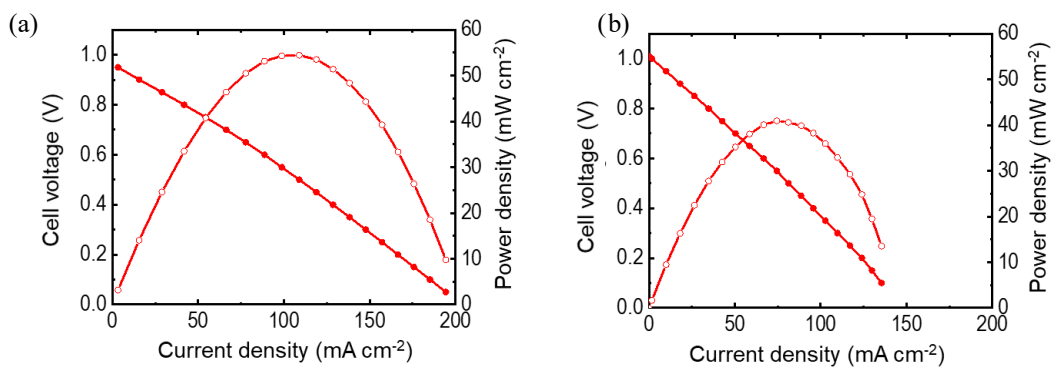


図2 PLD法で作製したPCFCセルの600°Cにおける電流-電圧曲線
(a) Ni-BZY|BZY|LSCF (単層膜型) (b) Ni-BZY|BZY|LDC|LWO|LDC|LSCF (積層膜型)

(4-③) エネルギー貯蔵用活物質 (キャリア粒子) の開発と酸化還元反応速度の評価

化学ループ法によるエネルギー変換・貯蔵技術の高効率化および高出力化を目的として、酸化還元繰り返し反応に対して高活性・高安定性を示すエネルギー貯蔵用活物質としてのキャリア粒子の合成および形態観測手法の構築を行った。金属酸化物によるキャリア粒子として、酸化還元を行う酸化鉄などの金属酸化物と担体を複合化したより高性能なキャリア粒子が求められる。Al₂O₃を担体としFeを担持した標準的な人工キャリア粒子 (Fe/Al₂O₃) の酸化還元反応後の粒子断面のSEM観測と画像処理により、粒子内部の凝集状態を観測する手法を開発した。また、凝集の進行により酸化還元反応速度の低下についても検討し、凝集過程と酸化還元反応速度の相関について明らかにした。その成果は、英文誌において出版した (<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04966>)。

続いて、新規キャリア粒子の開発を行った。酸化還元反応速度の制御を目的として、鉄マンガング金属酸化物 (CaMn_{1-x}Fe_xO_{3-δ}; CMFO) について検討した。また、Feをドーピングしたジルコン酸バリウム (BaZr_{0.9-x}Fe_xY_{0.1}O_{3-δ}; BZFY) を固相法により調製した。BZFYはFeと複合化させ、300 μm程度の粒子に分級したものを試料として利用した (Fe/BZFY)。CMFOについてはFeとの複合化は行わず、単体の材料として酸化還元反応に使用した。酸化還元反応時の質量変化の時間依存性を測定し、その結果を修正 Shrinkage-core モデルでフィッティングすることで反応速度定数を求めた。また、反応速度の温度依存性も測定し、見かけの活性化エネルギーを算出した。反応初期と後半では反応の時定数が異なっており、前半と後半で分割してフィッティングを行った。還元反応の挙動から、反応の初期ではMnサイトで反応が進行し、後半ではFeサイトの還元反応が支配的であると考えられた。同様の反応速度の実験は、水蒸気による酸化反応過程 (水素生成過程) についても実施した。Feのドーピング量の制御により、酸化反応と還元反応の速度のバランスを調整することができる。実験で得られた反応速度の結果は、次節の流動層反応器のモデルに適用した。

Fe/BZFYについては、BZFYを酸化還元反応の反応速度の向上が観測された。この加速結果は、BZFYのプロトン・電子の混合伝導性に起因すると考えられる。また、酸化還元反応の繰り返しの伴う還元時のFeナノ粒子の析出が観測された。図3にFeを30%ドーピングしたBaZr_{0.6}Fe_{0.3}Y_{0.1}O_{3-δ} (BZFY30) の水素還元後の二次電子像と二次電子像を示す。還元時のFeナノ粒子の生成が観測された。Feは酸化時にBZFYに再固溶が期待される。従って、酸化還元反応の進行中に図5に示したようなFeの凝集が抑制されることが期待される。すなわち、酸化還元サイクル時に動的なFeナノ粒子の析出と再固溶が繰り返されることにより、Feの再分散が進行し、Feの凝集を抑制する効果が考えられた。

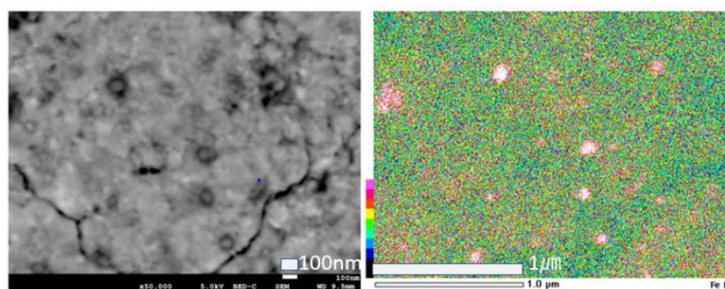


図3 水素還元後のBZFY30の二次電子像(左)とBZFY30のEDX像(右)

(4-④) エネルギー貯蔵用の流動層反応器の設計

酸化還元反応を利用したエネルギー貯蔵用の流動層反応器について検討を行った。ここでは、Kunii-Levenspiel モデル (KL モデル) により反応器設計を行った。流動層内で反応が進行するエマルジョン相とガス移動が進行するバブル相から成る二相モデルを仮定した。また、流動層内のキャリア粒子は完全混合を仮定し、反応器下部から導入される反応気体の濃度は、反応器の高さに応じて変化すると仮定した。前節の反応速度解析によって求めたキャリア粒子の反応速度定数を用い、流動層高さ方向に対するガス濃度分布を計算した。同時に、流動層内のキャリア粒子の転化率の時間依存性の計算も行った。流動層反応器上部における水素の出口濃度の時間依存性を計算したところ、転化率が 1 に近い領域まで流動層出口の水素濃度がほぼ一定に保持され、定常運転が可能であることが示された。

(4-⑤) エネルギー貯蔵型 PCFC システムの評価とシステムデザインの展開

開発した PCFC と流動層を組み合わせたエネルギー貯蔵型 PCFC システムを構築し、性能評価を行った。総合効率では、酸化還元反応のエンタルピー変化の予測から、CMFO0~30 (CaMnO₃~CaMn_{0.7}Fe_{0.3}O_{3.6}) が CMFO100 (Ca₂Fe₂O₅) と比較して約 4.5%向上する可能性が示唆された (図 4a)。ただし、酸化還元時のエンタルピー変化の値の精度については今後の詳細な検討が必要である。さらに、水素圧縮の際の高圧タンクと圧縮機と比較して初期コストにおける優位性についても確認された (図 4b)。高圧タンクと圧縮機のシステム全体に占める割合は大きく、PCFC を含むシステム全体に対してもコストを 30~50%程度低減する効果があると考えられる。また、PCFC を 1 MW 級に大型化することで、流動層を 5 m 程度の高さまで低く設計し、システム全体を小型化することが可能である。

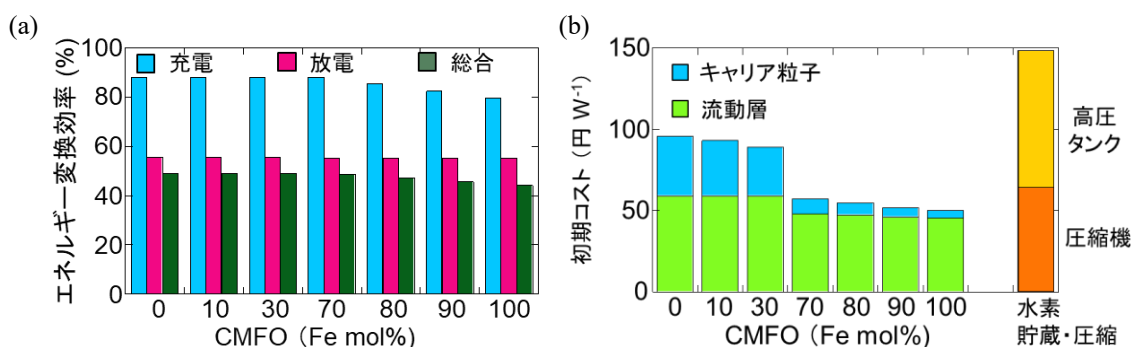


図 4 (a) システム効率の比較 (600°C 作動時) (b) エネルギー貯蔵に関する初期コストの比較

以上のシステムの応用として、水素によるキャリア粒子の還元と還元されたキャリア粒子と二酸化炭素の反応 (キャリア粒子の再酸化) による一酸化炭素生成システムについて提案を行った (図 5)。その成果について英文誌で発表を行った (<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101191>)。このように、本研究で検討した内容に基づき、エネルギー貯蔵に加え、脱炭素に向けた様々なシステムへの応用展開が可能である。

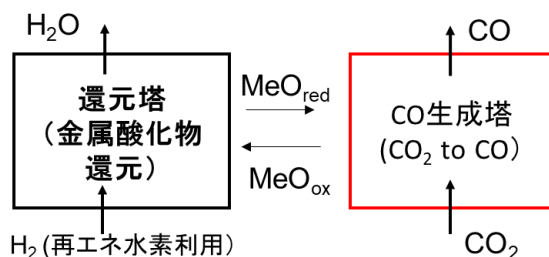


図 5 本研究の知見に基づく新システムへの展開 (CO₂ 活性化システム)

(4-⑥) まとめ

タングステン酸ランタンなどのプロトン伝導体のイオン・電子輸送特性を利用し、高効率な積層型 PCFC を設計することで、従来の燃料電池の発電効率を大きく向上させ、極めて高いエネルギー変換効率を示すセル設計を提案した。続いて、エネルギー貯蔵用の新規キャリア材料を合成し、酸化還元反応に関する流動層での反応のシミュレーションを行い、流動層内の水素生成反応の反応速度と安定性について検討した。さらに、システム全体のエネルギー効率や初期コストを算出し、水素を圧縮・貯蔵するシステムよりも経済的な優位性を有することを明らかにした。さらに、本研究の知見に基づき、CO₂ リサイクルを想定した新システムへの応用展開も行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kojo Gen, Wei Xiaochu, Matsuzaki Yoshio, Matsuo Hiroki, Hellgardt Klaus, Otomo Junichiro	4. 巻 337
2. 論文標題 Fabrication and electrochemical performance of anode-supported solid oxide fuel cells based on proton-conducting lanthanum tungstate thin electrolyte	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Solid State Ionics	6. 最初と最後の頁 132 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssi.2019.04.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuo Hiroki, Kojo Gen, Sakata Kazuma, Matsuzaki Yoshio, Otomo Junichiro	4. 巻 91
2. 論文標題 Performance of Anode-Supported Proton-Conducting Solid Oxide Fuel Cells with Lanthanum-Based Thin Bilayer Electrolyte	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ECS Transactions (国際会議紀要)	6. 最初と最後の頁 1019 ~ 1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09101.1019ecst	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Yuya, Kosaka Fumihiko, Kikuchi Noriaki, Hatano Hiroyuki, Otomo Junichiro	4. 巻 57
2. 論文標題 Evaluation of Microstructural Changes and Performance Degradation in Iron-Based Oxygen Carriers during Redox Cycling for Chemical Looping Systems with Image Analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 5529 ~ 5538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.7b04966	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 MATSUO Hiroki, NAKANE Kenta, MATSUZAKI Yoshio, OTOMO Junichiro	4. 巻 129
2. 論文標題 Effect of lanthanum tungstate hole-blocking layer for improvement of energy efficiency in anode-supported protonic ceramic fuel cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 147 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.20204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keller Martin, Otomo Junichiro	4. 巻 40
2. 論文標題 CO production from CO2 and H2 via the rWGS reaction by thermochemical redox cycling in interconnected fluidized beds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of CO2 Utilization	6. 最初と最後の頁 101191 ~ 101191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcou.2020.101191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計47件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 大友順一郎
2. 発表標題 水素製造技術における燃料電池の役割と課題
3. 学会等名 第114回SOFC研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichiro Otomo, Gen Kojo, Hiroki Matsuo, Yoshio Matsuzaki
2. 発表標題 Cell Design and Performance of Proton-conducting Ceramic Fuel Cells by Controlling Transport Properties of Solid Electrolyte Membranes
3. 学会等名 World Hydrogen Technologies Convention 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田 一峻、甚野 幸一、松尾 拓紀、大友 順一郎
2. 発表標題 イオン-電子混合伝導体の異相界面を利用した固体酸化物形燃料電池の作製と電気化学特性評価
3. 学会等名 化学工学会横浜大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Matsuo, Gen Kojo, Kazuma Sakata, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Performance of anode-supported proton-conducting solid oxide fuel cells with lanthanum-based thin bilayer electrolyte
3. 学会等名 16th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Matsuo, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Effect of thin bilayer electrolytes on performance of anode-supported proton-conducting solid oxide fuel cells
3. 学会等名 Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE) congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Matsuo, Gen Kojo, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Performance of anode-supported proton-conducting solid oxide fuel cells with stacked electrolyte layers
3. 学会等名 The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichiro Otomo, Gen Kojo, Kazuma Sakata, Hiroki Matsuo, Yoshio Matsuzaki
2. 発表標題 Design of highly efficient proton-conducting solid oxide fuel cells with multi-layered electrolyte membranes
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuma Sakata, Hiroki Matsuo, Gen Kojo, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Fabrication of anode-supported proton-conducting solid oxide fuel cells with bilayer electrolyte membranes
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichiro Otomo
2. 発表標題 Progress and outlook of proton-conducting ceramic fuel cells for highly efficient energy conversion, electrolysis, and energy carrier
3. 学会等名 化学工学会第85年会 国際シンポジウム(要旨公開) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾拓紀、阪田一真、松崎良雄、大友順一郎
2. 発表標題 電解質積層構造を有する固体酸化物形燃料電池の高効率化
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (要旨公開)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 那須雄太、松尾拓紀、大友順一郎
2. 発表標題 酸化物イオン・電子混合伝導体の異相界面における電気化学的特性評価
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (要旨公開)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西 泰介、大友順一郎
2. 発表標題 金属酸化物を用いた水素エネルギー貯蔵システムの設計と評価
3. 学会等名 化学工学会第85年会（要旨公開）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾 拓紀、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 固体酸化物燃料電池の高効率化に向けた電解質積層効果の検証
3. 学会等名 電気化学会第87回大会（要旨公開）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阪田 一真、松尾 拓紀、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性固体酸化物形燃料電池の電解質多層化による輸送特性制御
3. 学会等名 電気化学会第87回大会（要旨公開）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Julian Andres Ortiz Corrales , Hiroki Matsuo , Junichiro Otomo
2. 発表標題 Design and performance of a proton-conducting solid oxide electrolysis cell using lanthanum tungstate as electrolyte
3. 学会等名 電気化学会第87回大会（要旨公開）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gen Kojo, Hiroshi Tadokoro, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Evaluation of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells using Lanthanum Tungstate as a Proton-Conducting Solid Electrolyte Membrane
3. 学会等名 22nd Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Matsuo, Gen Kojo, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Fabrication and evaluation of electrode-supported type fuel cells with proton-conducting lanthanum tungstate
3. 学会等名 The 19th International Conference on Solid State Protonic Conductors (SSPC-19) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小城元、松崎良雄、松尾拓紀、大友順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性タングステン酸ランタンを用いた燃料電池 セル作製と輸送特性の影響
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichiro Otomo, Martin Keller, Hikaru Oka, Kazuki Matsubara, Takeshi Hatanaka
2. 発表標題 "Reaction Kinetics and Stability of Calcium-Modified Ilmenite Redox Cycles of Chemical Looping Systems
3. 学会等名 5th International Conference on Chemical Looping (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小城元、松崎良雄、松尾拓紀、大友順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性中温作動燃料電池における輸送特性が発電効率に与える影響
3. 学会等名 2018年電気化学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大友順一郎
2. 発表標題 高効率燃料電池システム実現に向けた取り組みと将来の役割
3. 学会等名 水素エネルギー協会 (HESS) 第157回定例研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小城元、松崎良雄、松尾拓紀、大友順一郎
2. 発表標題 タングステン酸ランタンを用いたプロトン伝導性電極支持型燃料電池の中間層が発電性能に与える影響
3. 学会等名 第27回SOFC研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichiro Otomo
2. 発表標題 Recent advances in highly efficient fuel cell systems with proton-conducting solid electrolytes and their applications
3. 学会等名 2018 Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials (GREEN 2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junichiro Otomo, Gen Kojo, Hiroki Matsuo, Yoshio Matsuzaki
2. 発表標題 Material and Cell Design of Highly Efficient Proton-conducting Ceramic Fuel Cells
3. 学会等名 5th Annual World Congress of Smart Materials
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ケラーマーチン、大友 順一郎
2. 発表標題 CO2 activation via rWGS redox cycling -exploiting phase changes or oxygen nonstoichiometry?
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小城元、松尾拓紀、松崎良雄、大友順一郎
2. 発表標題 電解質多層化によるプロトン伝導性固体酸化物形燃料電池の高効率化の検討
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田所 洸、松尾拓紀、大友順一郎
2. 発表標題 固体酸化物形燃料電池の金属-プロトン伝導体界面における水素拡散機構の検討
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原 一起、ケラーマーチン、大友 順一郎
2. 発表標題 三塔式ケミカルループ燃焼システムにおけるCa改質型イルメナイト系酸素キャリア粒子の構造と反応速度の評価及びシステム設計
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小城 元、松尾 拓紀、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性固体酸化物形燃料電池の電解質多層化による輸送特性制御
3. 学会等名 2019年電気化学会第86回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gen Kojo, Reina Reinga Tsukimura, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Material and cell design for proton-conducting solid oxide fuel cells using lanthanum tungstate with high La/W ratio
3. 学会等名 21th International Conference on Solid State Ionics (SSI-21) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小城 元、月村 玲菜、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 タングステン酸ランタンの物性評価及び燃料電池セル化の検討
3. 学会等名 化学工学会東京大会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 有賀 耀介、高坂 文彦、大友 順一郎
2. 発表標題 ケミカルループ法における鉄ドーブチタン酸カルシウム担体による水素生成反応の促進効果
3. 学会等名 化学工学会東京大会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小城 元、月村 玲菜、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 タングステン酸ランタンを用いた中温作動燃料電池セル化の検討
3. 学会等名 2017年電気化学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小城 元、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導型中温作動燃料電池の作製と電極反応特性
3. 学会等名 第26回SOFC研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小城 元、田所 洸、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性固体酸化物形燃料電池における輸送特性と発電効率の相関
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本 隼輔、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性固体酸化物形電解セルのイオン・電子輸送特性と水蒸気電解への影響
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大友 順一郎
2. 発表標題 固体酸化物形燃料電池の技術的可能性と将来の役割
3. 学会等名 化学工学会第83年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小城 元、田所 洸、橋本 隼輔、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 電解質の輸送特性に基づくプロトン伝導性固体酸化物形燃料電池の高効率化の検討
3. 学会等名 電気化学会第85回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾 拓紀、中根 健太、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 BaZr _{0.8} Y _{0.2} O ₃ - およびBaZr _{0.1} Ce _{0.7} Y _{0.1} Yb _{0.1} O ₃ - を用いたプロトン伝導性固体酸化物形燃料電池における電解質積層効果
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島 星也、松尾 拓紀、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性ランタン系酸化物混合電解質膜の水素透過測定
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Matsuo, Kenta Nakane, Yoshio Matsuzaki, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Improvement of Energy Efficiency in Anode-Supported Proton Ceramic Fuel Cells by Lanthanum Tungstate Hole Blocking Layer
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Julian Ortiz-Corrales, Hiroki Matsuo, Junichiro Otomo
2. 発表標題 Design and Performance of a Proton-Conducting Solid Oxide Reversible Cell
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大友順一郎、松尾拓紀、Ortiz Corrales Julian Andres、山手 駿
2. 発表標題 固体酸化物形燃料電池の技術および経済性評価 - プロトン伝導性セラミックス燃料電池の実用化に向けた評価の取り組み -
3. 学会等名 第29回SOFC研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島 星也、松尾 拓紀、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性酸化物混合電解質膜の輸送特性評価
3. 学会等名 化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田 亮輔、松尾 拓紀、松崎 良雄、大友 順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性電解質薄膜の低温合成と電解質積層型燃料電池への適用
3. 学会等名 化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山村 泰平、大友 順一郎
2. 発表標題 パッチ式流動層型蓄エネルギーシステムにおける鉄・マンガン系キャリア材料開発と反応モデル解析
3. 学会等名 化学工学会第86年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾拓紀、中根健太、松崎良雄、大友順一郎
2. 発表標題 プロトン伝導性固体酸化物形燃料電池の高効率化に向けた積層型電解質の設計
3. 学会等名 2021年電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 混合伝導体層を有する固体酸化物燃料電池	発明者 大友 順一郎、松尾 拓紀、松崎 良雄	権利者 国立大学法人東 京大学、東京瓦 斯株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-226798	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

大友研究室ホームページ http://www.tse.ens.titech.ac.jp/~otomolab/index.html
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	Imperial College London		